

УДК 621.745.55

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.71217

М.М. Ямшинський, Г.Є. Федоров

НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОСТІЙКОСТІ ХРОМОАЛЮМІНІЄВИХ СТАЛЕЙ

Background. Under the conditions of rapid heating-cooling, nonuniform temperature fields occur in the volume of the part that contribute to the accumulation of thermal stresses. Such stresses may exceed the yield point of the alloy and destroy part's material. The form of parts' destruction depends on the properties of metal and operating conditions. A typical form of destruction is cracking. It was determined by the analysis of operation of thermal-resistant parts that the choice of alloy with high oxidation resistance is necessary, but not enough to provide the specified life of thermal-resistant items, since in thermal cycling conditions heat resistance of metal begins to appear primarily.

Objective. The aim of the work is to establish the effect of carbon and rare earth metals on heat resistance of thermal-resistant Cr-Al steels for work in extreme conditions and the study of the kinetics and mechanism of destruction of metal.

Methods. Samples of 90 mm in length and 12 mm in diameter were subjected to heat treatment in a box furnace to 1100 °C, and chilled under running water. Assessment of heat resistance was done with the appearance of thermal fatigue cracks on the side surface or at their ends. Phase composition and structure were investigated by modern X-ray diffraction and metallographic methods.

Results. The mechanism and kinetics of the destruction of cast metal under conditions of thermal cycles were determined. The selection of Cr-Al steel for work under extreme conditions should be made with regard to its mechanical, physical, physico-chemical and technological properties, as well as the design features of a particular casting.

Conclusions. To achieve high heat resistance in the conditions of high variable temperatures Cr-Al steel should comprise 25–30 % of Cr, 1.0–3.0 % of aluminum, 0.3–0.6 % of titanium, 0.2–0.4 % of C and 0.15–0.40 % of rare earth metals.

Keywords: carbon; rare earth metals; Cr-Al steel; structure; heat resistance.

Вступ

Велике значення для захисту металів від інтенсивного окиснення в умовах високих температур має міцність зчеплення плівки оксидів з поверхнею деталі, невелика різниця коефіцієнтів лінійного розширення оксидів і металу та хімічна стійкість оксиду в агресивному середовищі. Проте аналізом експлуатації жаростійких деталей установлено, що вибір сплаву з високою окислостійкістю є необхідним, але недостатнім для забезпечення заданої довговічності жаростійких виробів. Це пов'язано з тим, що більшість жаростійких деталей у процесі експлуатації працюють з періодичними нагріваннями та охолодженнями, тобто піддаються тепловим змінам у різних інтервалах температур. При цьому значною мірою деталі виходять із ладу внаслідок руйнування після накопичення термічних напружень. Максимальні температурні напруження можуть перевищувати межу течучості сплаву й руйнувати матеріал деталі [1]. За швидких нагрівань-охолоджень, унаслідок обмеженої теплопровідності сплаву, в об'ємі деталі виникають нерівномірні температурні поля, які й сприяють накопиченню термічних на-

пружень, оскільки природній тепловій зміні розмірів деталі заважають її сусідні, які мають більше або менше нагріті зони.

Здатність деталей витримувати без руйнування значну кількість теплових змін є спеціальною характеристикою жаростійких сплавів. Процес руйнування сплавів в умовах теплових змін характеризують як термічну втоми, а опір сплаву термічній утомі – як термостійкість [2].

Руйнуванню від термічної втоми піддаються всі деталі, які працюють в умовах змінних температур, тому термостійкість металу є однією із основних характеристик, які визначають довговічність жаростійких деталей устаткування, що працює у високотемпературних технологіях (теплоенергетика, металургія, хімічна галузь тощо).

Характер руйнування деталей від термічної втоми дуже різний і залежить від властивостей металу та умов експлуатації. Часто під час вибору матеріалу для жаростійких виливків не приділяють уваги впливу його термостійкості на довговічність експлуатації литих деталей. У цей же час реальний строк експлуатації більшості таких деталей менший за час, який обмежується окислостійкістю сплаву.

Виливки, які менше піддаються різким змінам температур, працюють довше, ніж ті, що частіше піддаються нагріванню-охолодженню.

Типовий для термічної втоми характер руйнування – розтріскування – притаманний деталям теплоенергетичного устаткування. Це пов'язано з різкими коливаннями температури деталей під час зміни теплового режиму роботи котлоагрегату, планових і аварійних зупинок теплоенергетичних блоків тощо. Наприклад, строк експлуатації насадок паливоспалювального пристрою котлоагрегату ТПП-110 не перевищує 10–15 діб (400 год), незважаючи на те, що сталь Х23Н19, яку частіше за інші використовують для виготовлення жаростійких деталей, має достатньо високу окислостійкість.

Термостійкість сплаву посилюється з підвищенням робочих параметрів високотемпературного устаткування, особливо якщо це супроводжується збільшенням кількості теплових змін у часі під час експлуатації. Зрозуміло, що для цього потрібні такі литі деталі, які б надійно працювали тривалий час за високих температур, з більшими кількістю теплових змін, діапазоном температурних перепадів і швидкістю нагрівання та охолодження [3, 4].

Отже, визначення оптимального хімічного складу жаростійких хромоалюмінієвих сталей для виготовлення виробів із високими окислювально- та термостійкістю є завданням досить актуальним. Актуальним також залишається питання щодо вивчення механізму та кінетики руйнування сплавів з високим вмістом хрому й алюмінію в умовах змінних високих температур і агресивних середовищ.

Термостійкість – це здатність матеріалу зберігати міцність, пластичність та експлуатаційні характеристики під час зміни температурних умов експлуатації, тобто витримувати теплових змін без руйнування. У рамках цього поняття часто використовують термін “термічна втома”. Під термічною втомою розуміють появу тріщин у деталях, які утворюються циклічними термічними напруженнями. Ці напруження виникають унаслідок зміни розмірів окремих частин деталі під час нагрівання-охолодження.

Тріщини з'являються після деякої кількості теплових змін, що визначається властивостями матеріалу й параметрами, які характеризують умови роботи деталі. Ще до появи тріщин у матеріалі відбуваються незворотні зміни, які призводять до зміни механічних властивостей.

Відомо [2, 3], що руйнування деталей від циклічних теплових змін залежить від багатьох факторів: це пов'язано як з умовами експлуатації та конструкції деталі, так і з фізичними, механічними, фізико-хімічними та технологічними властивостями сплаву. Основними факторами, які визначають термостійкість деталі, є рівень змінних температур, неоднорідність температурного поля в об'ємі деталі та її конструкція.

Авторами [1, 4–6] однозначно встановлено, що зі збільшенням розмірів зерен сплаву та міжзеренних прошарків термостійкість металу знижується. Установлено також, що термостійкість сплавів має пряму залежність від розмірів зерен, а сплави, для яких характерне руйнування по межах зерен, менш термостійкі, ніж ті, в яких тріщина поширюється зернами. Отже, термостійкість сплавів визначається механізмом і кінетикою розвитку в них термовтомних дефектів. Крім того, авторами цих праць однозначно встановлено, що термостійкість металу знижується зі збільшенням максимальної температури циклу і температурного перепаду в об'ємі деталі.

Опір матеріалу термічній утомі значною мірою залежить від термоструктурних напружень, які виникають між окремими структурними складовими сплаву. Щодо цього питання в літературі наводяться суперечливі дані. Наприклад, жароміцні сплави на нікелевій і кобальтовій основах мають вищу довготривалу міцність за змінних температур, ніж за сталих [2, 5]. Такі дані не дають можливості точно оцінити роль структурних напружень під час термовтомного руйнування матеріалу. Очевидно, що характер впливу різних структурних складових буде визначатись не тільки їх загальною кількістю, пружними та фізичними властивостями, але й формою та розподілом, які визначають вірогідність концентрації напружень.

Здатність металу утворювати на поверхні захисну окисну плівку є важливою передумовою забезпечення високої термостійкості. У реальних умовах роботи жаростійкого виробу його термостійкість визначається значною мірою властивостями поверхневого шару металу, який під час окиснення втрачає свою щільність, а значить, і міцність.

Цим можна пояснити те, що термостійкість у відновлювальній атмосфері вища, ніж в окиснювальній. Під час вигорання з поверхневих шарів хрому, вуглецю та алюмінію міцність і пластичність металу зменшуються. Мікротріщини, які утворюються в місцях знещільненого металу,

дають можливість проникати кисню й азоту в приповерхневий шар, що призводить до прискорення процесу міжкристалічної корозії. Оксиди та нітриди, які накопичуються на межах, під час охолодження створюють додаткові напруження внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення утворених фаз, при цьому поширення тріщини вглиб металу прискорюється. Отже, можна вважати, що підвищення термостійкості металу можна досягти утворенням на поверхні виробу щільної захисної плівки.

Автори праць [5–8] стверджують, що тріщини термічної втоми з'являються переважно в місцях, де виникли дефекти технологічного походження (різнозеренна структура, неметалеві включення різної морфології, ліквіація хімічних елементів тощо). У цьому випадку тріщини виникають і поширюються ланцюгами неметалевих включень. У той же час ливарні дефекти можуть і не проявлятися, якщо ці дефекти не потрапили до місць концентрації напружень і меж з максимальною нерівномірністю температурного поля під час теплових змін. Це також підтверджує висновок, що для досягнення високої термостійкості необхідно дотримуватися правильно розробленої технології виготовлення виливків.

Постановка задачі

Аналізом літературних даних встановлено, що для забезпечення високої термостійкості металу у виливках необхідні дрібнозерниста структура, стабільний фазовий склад, низький коефіцієнт лінійного розширення та високі його міцність і пластичність. Метою роботи є дослідження впливу вуглецю та рідкісноземельних металів (РЗМ) на термостійкість хромоалюмінієвої сталі і кінетику та механізм руйнування високолегованого металу в умовах теплових змін.

Методика дослідження

Оскільки для металевих матеріалів небезпечнішими є термічні напруження у високотемпературній зоні, коли метал втрачає свою міцність, а усадка за цих температур повністю переходить у пластичну деформацію, яка спричиняє розвиток незворотного структурного пошкодження й у подальшому призводить до руйнування, для скорочення часу випробовування було вибрано інтервал зміни температур 20–1100 °С. Для цього зразки довжиною 90 мм і діаметром 12 мм піддавали нагріванню в камер-

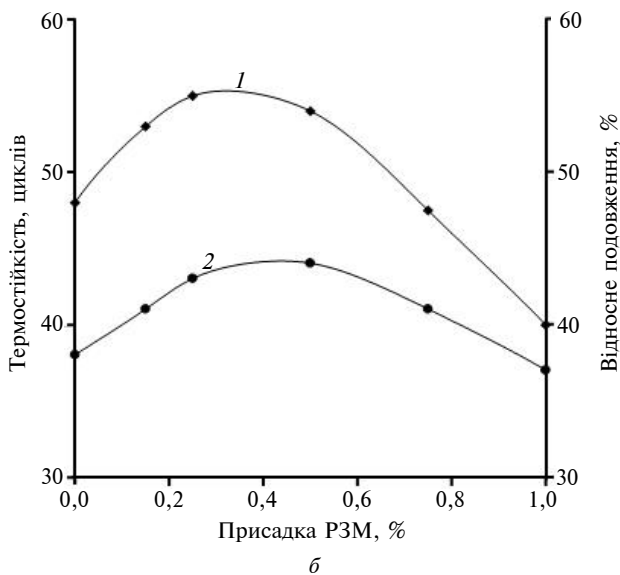
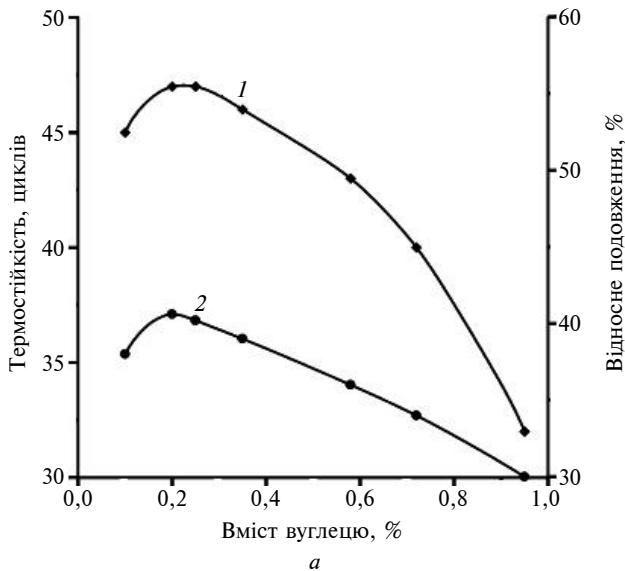
ній печі до 1100 °С і різко охолоджували в проточній воді з температурою близько 20 °С. Випробовування зразків здійснювали до появи на боковій поверхні або на її торцях тріщин термічної втоми. Така методика дає можливість у кожному досліді вимірювати зміну електричного опору зразка, за якою оцінювали зміну щільності поверхневих шарів зразка та його структури.

Основні результати досліджень

Виконаними раніше дослідженнями [9, 10] встановлено, що хром, алюміній і титан значно впливають на пластичні властивості металу, змінюють структуру та фазовий склад хромистої сталі. Зміна хімічного складу призводить до суттєвої зміни механічних та фізичних властивостей, які визначають інтенсивність розвитку пластичної деформації під час термічного навантаження. Для досягнення високої термостійкості хромоалюмінієва сталь має містити 25–30 % хрому, 1,0–3,0 % алюмінію та 0,3–0,6 % титану. За менших концентрацій титану внаслідок утворення ним значної кількості оксидних плівок, які залишаються в металі, термостійкість останнього істотно погіршується.

Нами досліджено вплив вуглецю як основного елемента будь-якої сталі та РЗМ як високоєфективного десульфуратора, дефосфоратора та дегазатора сплавів на основі заліза на термостійкість хромоалюмінієвої сталі базового хімічного складу.

Вплив вуглецю на термостійкість хромоалюмінієвих сталей. У праці [1] показано, що термостійкість сталей з високим вмістом хрому істотно знижується з підвищенням вмісту вуглецю. Нами одержано протилежні результати (рисунк, *а*). Відомо, що вуглець негативно впливає на експлуатаційні властивості жаростійкої сталі, в т.ч. і на термостійкість. Нашими дослідженнями не підтвердився негативний вплив вуглецю на термічну втому в межах його концентрацій 0,1–0,5 %. Більше того, у феритній хромистій сталі, яка стабілізована алюмінієм до 3 %, вуглець поводить себе як елемент, який підвищує термостійкість, причому це покращання спостерігається за оптимального вмісту вуглецю 0,2–0,4 % (див. рисунок, *а*). Таку поведінку вуглецю можна пояснити тим, що, як показали металографічні дослідження, підвищення його вмісту до 0,4 % супроводжується подрібненням зерна (з 200–300 мкм за 0,05 % С до 60–80 мкм за 0,38 % С).



Зміна властивостей хромоалюмінієвої сталі Х30Ю2Л залежно від вмісту вуглецю (а) та 30Х30Ю2Л залежно від присадки РЗМ (б): 1 – термостійкість; 2 – відносне подовження

Подрібнення структури металу призводить до збільшення міжзеренної деформаційної здатності, яка визначає високотемпературну пластичність сплавів, зміцнених твердим розчином. Необхідно відзначити, що сталь, яка має дрібну структуру, механічно зміцнюється, оскільки велика кількість міжфазових меж слугує хорошим розподілювачем накопичуваних термовтомних дефектів дислокаційного походження та вакансій.

Підвищення вмісту вуглецю понад 0,4 % неістотно впливає на розміри зерен фериту, але при цьому збільшуються кількість і розміри залізохромистих карбідів, які розміщуються ме-

жами зерен. Це сприяє зниженню пластичності металу внаслідок зростання внутрішньокристалічних концентрацій напружень і деформацій. Якщо вміст вуглецю в сталі перевищує 0,5 %, то в її структурі виникають крупні, з малим ступенем ізольованості, карбідні скупчення, які слугують концентраторами термовтомних тріщин – унаслідок цього кількість тепловмін зменшується. Підвищення в хромоалюмінієвій сталі вмісту вуглецю понад 0,6 % призводить до швидкої появи на поверхнях зразків тріщин, яких за малих концентрацій вуглецю не виникає взагалі. Одночасно з цим зменшується пластичність сталі, що й зумовлює зниження термостійкості.

Таким чином, вуглець у кількості до 0,4 % сприяє підвищенню термостійкості хромоалюмінієвої сталі внаслідок подрібнення структури металу та покращання його механічних властивостей за високих температур.

Вплив рідкісноземельних металів на термостійкість хромоалюмінієвих сталей. Подрібнення структури та покращання термостійкості хромоалюмінієвої сталі можна досягти додатковим обробленням її РЗМ. РЗМ покращують механічні властивості високолегованих сталей завдяки зміцненню міжатомних зв'язків у твердому розчині [11]. Установлено, що оброблення середньовуглецевої хромоалюмінієвої сталі 30Х30Ю2Л 0,15–0,45 % РЗМ дійсно сприяє підвищенню високотемпературних міцності та пластичності й термостійкості на 10–12 % (див. рисунок, б).

Підвищення цих властивостей відбувається внаслідок сприятливого розподілу карбідів хрому й зміни форми та розміщення неметалевих включень унаслідок глибокого рафінування сталі. В сталі без РЗМ карбіди розміщуються межами зерен й утворюють суцільну сітку, а в сталі, яка оброблена РЗМ, частина їх міститься на межах зерен, а частина – в об'ємі зерен фериту. Можна припустити, що фактором перерозподілу є зниження розчинності вуглецю у фериті за високих температур. Але якщо в сталь додати понад 0,5 % РЗМ, то її термостійкість знижується. Це пояснюється схильністю зерен фериту сталі до крихкого руйнування внаслідок виокремлення металідів CeFe_2 й CeFe_3 межами зерен, які під час термоцикування розколюються та подрібнюються, при цьому утворюються тріщини по межах міжфазових прошарків, через які викришуються цілі блоки.

Отже, з точки зору високотемпературної термічної втоми хромоалюмінієву сталь доцільно оброблювати 0,15–0,40 % РЗМ, насамперед беручи до уваги те, що останні істотно підвищують міцність металу й практично не змінюють його коефіцієнт лінійного розширення.

Дослідження механізму та кінетики руйнування литих хромоалюмінієвих сталей. Механізм і кінетику руйнування литих сталей цього класу в умовах теплових змін вивчали на зразках, виготовлених із металу з різними хімічним складом і структурами (таблиця).

Загальну закономірність термічної втоми досліджували на сталі 40Х25Ю1Л (сталь 2, таблиця), структура якої складається із фериту та карбідів і практично не змінюється під час нагрівання до 1100 °С. Механізм розвитку термічної втоми в цій сталі найпростіший.

Вплив фазових перетворень на швидкість термовтомного руйнування вивчали на зразках зі сталі 30Х25Л (сталь 1, таблиця), яка в процесі нагрівання до 1100 °С має часткове $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення. Для вивчення впливу дисперсійних твердих частинок фаз округлої форми досліджували сталь із вмістом РЗМ 0,15 % (сталь 3, таблиця).

Дисперсійно зміцнену титаном сталь (сталь 4, таблиця) також піддавали дослідженню, оскільки карбіди та карбонітриди титану мають гострокутну форму та істотно зменшують кількість термоциклів. Процес термічної втоми сталей зі зміцненим твердим розчином досліджували з використанням хромонікелевої сталі (сталь 5, таблиця). Дослідження зміни структури металу дали змогу встановити, що процес руйнування зразків можна розділити на декілька стадій, яким притаманні свої механізми розвитку процесів руйнування.

Перша стадія термічної втоми являє собою область початкового деформаційного зміцнення. Суть цього процесу полягає в тому, що деформація в структурі розподіляється нерівномірно. Спочатку деформуються ті зерна, в яких унаслідок сприятливої орієнтації розвиваються

найбільші сколювальні напруження. Основним фактором, який визначає ступінь нерівномірності термічної втоми на першій стадії, є розміри зерен литої сталі та її різнозеренність. Крупні зерна сплаву деформуються швидше й сильніше. Суттєвий вплив мають фазові перетворення в сталі під час термоциклування, які призводять до появи зерен з неоднаковими внутрішніми напруженнями. Деформація в режимі 20–1100 °С відбувається внаслідок тонкого ковзання. Крім того, за швидкого нагрівання до 1100 °С відбуваються швидкі процеси релаксації напружень. Основними способами зниження нерівномірності розподілу пластичної деформації на початку термічного руйнування є подрібнення зерен сталі, усунення її різнозеренності та забезпечення стабільної рівноважної структури металу під час нагрівання-охолодження.

Таким чином, перша стадія термічної втоми характеризується вирівнюванням пластичної деформації окремих зерен сталі. Прямих ознак руйнування матеріалу на цій стадії не спостерігається. Але локалізація пластичної деформації на першій стадії в окремих зернах сталі створює передумови для ранішого зародження в них перших дефектів термічної втоми внаслідок вичерпання місцевого ресурсу пластичності металу.

Відомо [2, 9], що термічна втома металів і сплавів є результатом спільного протікання в матеріалі під впливом циклічних змінних температур і напружень процесів зміцнення та знеміцнення матеріалу. Такий процес найбільше виражений на другій стадії термічної втоми. Міжзеренне ковзання відбувається легко до того часу, доки на шляху руху граничних шарів металу не зустрінеться виділення, що важко піддається деформуванню. Для подальшого розвитку деформації зовнішні напруження мають бути збільшені. Це приводить до деякого зміцнення металу. Одним із головних процесів, який контролює ступінь зміцнення-знеміцнення металу на другій стадії, є швидкість зародження та дифузійна ру-

Таблиця. Хімічний склад досліджених сталей

Індекс сталі	Марка сталі	Хімічний склад, %					
		Cr	C	Al	Mn	Si	інші
1	30Х25Л	22,3	0,36	—	0,52	1,05	—
2	40Х25Ю1Л	24,4	0,40	1,06	0,57	1,10	—
3	40Х25Ю1Л	25,5	0,38	0,98	0,55	1,12	0,15 Ce
4	40Х25Ю3Т2Л	24,8	0,38	2,95	0,47	0,61	1,96 Ti
5	30Х24Н12СЛ	24,6	0,29	—	0,67	1,35	13,10 Ni

хомість вакансій. Під час дослідження на термостійкість в області високих температур участь вакансій може бути суттєвою. Різке охолодження з високих температур (1100 °C) фіксує в металі підвищену концентрацію вакансій, рівновагу за максимальної температури циклу дослідження. Дослідженнями термостійкості сталі 40X25Ю1Л встановлено, що вже на початку випробовувань з'являються дрібні угруповання вакансій. Зі збільшенням циклів кількість і розміри вакансій цих угруповань збільшуються. Деякі з них ростуть швидше за інші й утворюють усередині зерен субмікроскопічні та мікроскопічні пори. Оскільки коагуляція дефектів відбувається дифузійним шляхом, то пори розвиваються швидше на межах зерен, де дифузійні процеси перебігають значно легше, ніж в об'ємі зерен [12–14]. Частина зафіксованих у металі вакансій переноситься дифузією на міжфазові межі під час нагрівання до T_{\max} , а друга частина залишається та коагулює всередині зерна, що зумовлює зниження щільності металу. Після деякої кількості циклів відбувається дифузійний перерозподіл дефектів на міжфазні межі, в нашому випадку на межі зерен. Оскільки дислокації не можуть утворитися всередині пружного середовища металевої матриці сталі, то вони рухаються до міжфазових меж і тягнуть за собою вакансії та атоми домішок [15]. Після цього дифузійні процеси полегшуються через високу концентрацію точкових дефектів у зернах настільки, що швидкість переносу дефектів на межі перевищує швидкість їх коагуляції в об'ємі зерен сталі. Внаслідок цього пори на межах зерен можуть зникати, а всередині зерен інтенсивно зростати. Одночасно відбувається ріст зерен і збільшується частка деформації внаслідок міжзеренного ковзання. З початком дифузійного перерозподілу дефектів закінчується друга стадія термічної втоми й починається третя, яка зумовлює руйнування зразка.

Отже, основним механізмом термічної втоми литої сталі на другій стадії є міжзеренне ковзання, а також зародження, дифузія та коагуляція точкових дефектів. Тривалість другої стадії, а відповідно, й загальна термостійкість сталі, значною мірою залежать від сил міжатомних зв'язків у кристалічній ґратці.

На початку третьої стадії внаслідок збільшення кількості циклів виникають крупні пори на межі дотикання кількох зерен, тобто в місцях концентрації вакансій. Після збільшення розмірів пор понад 10–15 мкм [1, 15] стає можливим відривання зерен одне від другого з утворенням клиноподібних пор, які, збільшуючись у

розмірах, стають додатковими концентраторами напружень. Це явище вказує на те, що в матеріалі закінчився запас пластичності в окремих макроскопічних об'ємах. Третя стадія термічної втоми обмежується такою деформацією, за якої окремі крупні пори утворюють суцільну тріщину.

Можна вважати, що швидкість проходження третьої стадії термічної втоми буде визначатись кількістю та розподілом мікропор, які утворилися на другій стадії. Для дрібнозернистих сталей (наприклад, оброблених титаном) тривалість третьої стадії може бути довшою внаслідок більш рівномірного розподілу дефектів і наявності в структурі литої сталі дисперсних твердих фаз.

Четверта стадія характеризується інтенсивним розвитком руйнування сталі внаслідок з'єднання окремих клиноподібних тріщин і розривання металевих перешийків між двома сусідніми границями, які насичені порами. Повне руйнування зразка відбувається внаслідок злиття дрібних тріщин в одну велику тріщину, яка поширюється через весь зразок, або внаслідок втрати зразком механічної міцності. У деяких зразках спостерігаються декілька зон руйнування, залежно від утворених меж концентрацій деформацій.

Таким чином, четверта стадія термічної втоми протікає внаслідок концентрації напружень і деформацій мікротріщинами термічної втоми.

Отже, термостійкість сплаву є функцією всього комплексу властивостей: механічних, фізичних, фізико-хімічних і технологічних. Для досягнення високої термостійкості сталей з високим вмістом хрому й алюмінію необхідно брати до уваги всі фактори, в т.ч. дотримуватися правил проектування та розроблення технології виготовлення жаростійкого виливка.

Висновки

Визначення оптимального хімічного складу жаростійкої хромоалюмінієвої сталі з високими окалино- та термостійкістю для роботи в екстремальних умовах є складним і актуальним завданням.

Детальним аналізом літератури встановлено, що єдиної думки щодо механізму та кінетики руйнування металу в умовах різних теплових змін немає.

Для досягнення високої термостійкості в умовах високих змінних температур хромоалюмінієва сталь має містити 25–30 % хрому, 1,0–3,0 % алюмінію та 0,3–0,6 % титану.

Вуглець за вмісту в хромоалюмінієвій сталі в межах 0,2–0,4 % сприяє підвищенню її термостійкості внаслідок подрібнення структури та покращання механічних властивостей за високих температур.

Хромоалюмінієву сталь доцільно додатково обробляти 0,15–0,40 % РЗМ не тільки для підвищення її технологічних властивостей, але й для збільшення міцності та термостійкості.

Під час вибору для роботи в екстремальних умовах хромоалюмінієвої сталі з високими окислювально- й термостійкістю необхідно враховувати її механічні, фізичні, фізико-хімічні та технологічні властивості й брати до уваги конструктивні особливості виливка.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методології прогнозування термічної втоми від хімічного складу й умов експлуатації литих виробів.

Список літератури

1. Лютый В.А. Хромоалюминиевая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200 °С: Дисс. ... к.т.н. – К.: НТУУ “КПИ”, 1969. – 320 с.
2. Kookutla Ramesh. An experimental study on effect of aluminum oxide on strength and corrosion resistance // *Int. J. Eng. Res. Technol.* – 2014. – 3, iss. 11. – P. 269–271.
3. Баландин Ю.Ф. Термическая усталость металлов. – Л.: Судостроение, 1965. – 272 с.
4. Гудремон Э. Специальные стали. Т.1. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1966. – 736 с.
5. Владимиров И.А. Термостойкость жаропрочных сплавов. – М.: Оборонгиз, 1962. – 137 с.
6. Implementation of stainless steel buffer layer for reducing crack propagation on regulating valve disc / K.T. Sunny, N. Dinesh, N.P. Zacharia, V. Rosh // *Int. J. Eng. Res. Technol.* – 2015. – 4, iss. 04. – P. 414–417.
7. Abdel-Khalek A.A., Abd-El Ghani Sabrah B., Abdel Rhman Y. Kinetics of oxidation of novel ternary complexes of chromium involving or titanium and carbon // *Int. J. Eng. Res. Technol.* – 2015. – 4, iss. 11. – P. 370–377.
8. Гаврилюк В.П., Марковский Е.А. Литые железохромистые сплавы. – К.: Процессы литья при участии МП “Информ-лит”, 2001. – 260 с.
9. Ямшинский М.М., Федоров Г.Е., Радченко К.С. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах // *Вісник Донбас. держ. машинобуд. академії.* – 2015. – № 3 (36). – С. 33–37.
10. Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей залежно від вмісту хрому та алюмінію // *Вісник Донбас. держ. машинобуд. академії.* – 2016. – № 1 (37). – С.101–110.
11. Приданцев М.В. Влияние примесей и редкоземельных металлов на свойства сплавов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 208 с.
12. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи пластичности и ползучести. – К.: Наук. думка, 1981. – 496 с.
13. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1966. – 195 с.
14. Гецов Л.Б. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. – М.: Машиностроение, 2005. – 52 с.
15. Результати дослідження термоциклічної довговічності жароміцних матеріалів газотурбінних двигунів / М.С. Кулик, О.Г. Кучер, М.О. Ковешніков та ін. // *Наукоємні технології.* – 2010. – № 4. – С. 5–13.

References

1. V.A. Ljutyj, “Cr-Al steel castings for operating at variable temperatures up to 1200 °C”, Ph.D. dissertation, Dept. Technic. Eng. of NTUU KPI, Kyiv, 1969 (in Russian).
2. Kookutla Ramesh, “An experimental study on effect of aluminum oxide on strength and corrosion resistance”, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, iss. 11, pp. 269–271, 2014.
3. Ju.F. Balandin, *Thermal Fatigue of Metals*. Leningrad, USSR: Sudostroenie, 1965 (in Russian).
4. Je. Gudremon, *Special Steels*, vol. 1, 2nd ed. Moscow, USSR: Metallurgija, 1966 (in Russian).
5. I.A. Vladimirov, *Temperature Resistant Superalloys*. Moscow, USSR: Oborongiz, 1962 (in Russian).
6. K.T. Sunny *et al.*, “Implementation of stainless steel buffer layer for reducing crack propagation on regulating valve disc”, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, iss. 04, pp. 414–417, 2015.
7. A.A. Abdel- Khalek, *et al.*, “Kinetics of Oxidation of Novel Ternary Complexes of Chromium Involving or titanium and carbon”, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, iss. 11, pp. 370–377, 2015.
8. V.P. Gavriljuk and E.A. Markovskij, *Cast Iron Chromium Alloys*. Kyiv, Ukraine: Processy lit'ja pri uchastii MP “Informlit'e”, 2001 (in Russian).
9. M.M. Jamshinskij *et al.*, “Thermal resistance of heat-resistant steels for use in extreme conditions”, *Visnyk Donbas'koї Derzhavnoї Mashinobudivnoї Akademії*, no. 3 (36), pp. 33–37, 2015 (in Ukrainian).

10. M.M. Jamshinskij and G.E. Fedorov, "Scale resistance Cr-Al steel depending on the contents of chromium and aluminum", *Visnik Donbas'koї Derzhavnoї Mashinobudivnoї Akademii*, no. 1 (37), pp. 101–110, 2016 (in Ukrainian).
11. M.V. Pridancev, *The Effect of Impurities and Rare Earth Metals on Properties of the Alloys*. Moscow, USSR: Metallurgizdat, 1962 (in Russian).
12. G.S. Pisarenko and N.S. Mozharovskij, *Equations and Boundary Value Problems of Ductility and Creep*. Kyiv, USSR: Naukova Dumka, 1981 (in Russian).
13. P. Sh'jumon, *Diffusion in Solids*. Moscow, USSR: Metallurgija, 1966 (in Russian).
14. L.B. Gecov, *Creep and Long-Term Strength of Metallic Materials*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 2005 (in Russian).
15. M.S. Kulik *et al.*, "The study results of thermal cyclic durability of heat resistant material turbine engines", *Naukoemni Tehnologii*, no. 4, pp. 5–13, 2010 (in Ukrainian).

М.М. Ямшинський, Г.Є. Федоров

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОСТІЙКОСТІ ХРОМОАЛЮМІНІЄВИХ СТАЛЕЙ

Проблематика. За швидких нагрівань-охолоджень унаслідок обмеженої теплопровідності сплаву в об'ємі деталі виникають нерівномірні температурні поля, які спричиняють накопичення термічних напружень. Такі напруження можуть перевищувати межу текучості сплаву й руйнувати матеріал деталі. Характер руйнування деталей залежить від властивостей металу й умов експлуатації. Типовим характером руйнування є розтріскування. Аналізом експлуатації жаростійких деталей теплоенергетичного устаткування встановлено, що вибір сплаву з високою окислостійкістю є необхідним, але недостатнім для забезпечення заданої довговічності жаростійких виробів, оскільки в умовах теплових змін насамперед проявляється термостійкість металу.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення впливу вуглецю і рідкісноземельних металів на термостійкість жаростійких хромоалюмінієвих сталей для роботи в екстремальних умовах, а також дослідження кінетики і механізму руйнування металу.

Методика реалізації. Зразки довжиною 90 мм і діаметром 12 мм піддавали нагріванню в камерній печі до 1100 °С і різко охолоджували в проточній воді. Оцінку термостійкості зразків здійснювали за появою на їх боковій поверхні або на торцях тріщин термічної втоми. Фазовий склад і структуру досліджували сучасними рентгеноструктурними та металографічними методами.

Результати досліджень. Установлено механізм і кінетику руйнування литого металу в умовах теплових змін. Вибір хромоалюмінієвої сталі для роботи в екстремальних умовах необхідно виконувати з урахуванням її механічних, фізичних, фізико-хімічних і технологічних властивостей, а також конструктивних особливостей конкретного виливка.

Висновки. Для досягнення високої термостійкості в умовах високих змінних температур хромоалюмінієва сталь має містити 25–30 % хрому, 1,0–3,0 % алюмінію, 0,3–0,6 % титану, 0,2–0,4 % вуглецю та 0,15–0,40 % рідкісноземельних металів.

Ключові слова: вуглець; рідкісноземельні метали; Cr-Al-сталь; структура; термостійкість.

М.М. Ямшинский, Г.Е. Федоров

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ХРОМОАЛЮМИНИЕВЫХ СТАЛЕЙ

Проблематика. В условиях быстрых нагреваний-охлаждений в объеме детали возникают неравномерные температурные поля, которые приводят к накоплению термических напряжений. Такие напряжения могут превышать предел текучести сплава и разрушать материал детали. Характер разрушения деталей зависит от свойств металла и условий эксплуатации. Типичным характером разрушения является растрескивание. Анализом эксплуатации жаростойких деталей теплоэнергетического оборудования установлено, что выбор сплава с высокой окислостойкостью является необходимым, но недостаточным для обеспечения заданной долговечности жаростойких изделий, поскольку в условиях тепловых змен в первую очередь проявляется термостойкость металла.

Цель исследования. Целью работы является установление влияния углерода и редкоземельных металлов на термостойкость жаростойких хромоалюминиевых сталей для работы в экстремальных условиях, а также исследование кинетики и механизма разрушения металла.

Методика реализации. Образцы длиной 90 мм и диаметром 12 мм подвергали нагреванию в камерной печи до 1100 °С и резкому охлаждению в проточной воде. Оценка термостойкости осуществляли по появлению на их боковой поверхности или на торцах трещин термической усталости. Фазовый состав и структуру исследовали современными рентгеноструктурными и металлографическими методами.

Результаты исследований. Установлены механизм и кинетика разрушения литого металла в условиях тепловых змен. Выбор хромоалюминиевой стали для работы в экстремальных условиях необходимо осуществлять с учетом ее механических, физических, физико-химических и технологических свойств, а также конструктивных особенностей конкретной отливки.

Выводы. Для достижения высокой термостойкости в условиях высоких переменных температур хромоалюминиевая сталь должна содержать 25–30 % хрома, 1,0–3,0 % алюминия, 0,3–0,6 % титана, 0,2–0,4 % углерода и 0,15–0,40 % редкоземельных металлов.

Ключевые слова: углерод; редкоземельные металлы; Cr-Al-сталь; структура; термостойкость.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського"

Надійшла до редакції
8 червня 2016 року